

*Моей жене Габаловой-Есипенко Людмиле Харитоновне
и нашим детям Марине и Дмитрию*



Есипенко Валентин Иванович

**ПРЯМОЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
КАСКАДНЫХ ГАММЕРШТЕЙНОВСКИХ
СИСТЕМ**

Монография

Москва
2014

УДК 621.372.061.2:519.21
ББК 72
Е 83

Рецензенты:

- Крылов В.В.** д-р.техн.наук, профессор (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, действительный член IEEE, РАИН);
- Орлов И.Я.** д-р.техн.наук, профессор (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Есипенко В.

Е 83 Прямой статистический анализ каскадных гаммерштейновских систем / В. Есипенко. – М.: Книга по Требованию, 2014. – 374 с.

ISBN: 978-5-518-34987-2

Изложена новая теория статистического анализа линейных динамических систем произвольной размерности.

Данная теория снимает все существующие ограничения на получение многомерной, произвольной размерности, плотности распределения вероятностей случайного процесса на выходе динамической системы при воздействии на её вход произвольного (в том числе не-гауссовского) случайного процесса.

В приложении рассмотрены конкретные примеры, позволяющие освоить новый рассматриваемый метод прямого статистического анализа линейных динамических систем и на его основе – прямой статистический анализ динамических систем произвольной сложности (содержащие в произвольном порядке включённые линейные и нелинейные функциональные преобразования).

Монография предназначена для научных работников и практиков в области статистического анализа динамических систем, а также может быть полезна для студентов, магистрантов и аспирантов вузов.

Рис. 26. Библиогр.: 155 назв.

Охраняется законом РФ об авторском праве. Воспроизведение всей книги или любой ее части воспрещается без письменного разрешения автора. Любые попытки нарушения закона будут преследоваться в судебном порядке.

УДК 621.372.061.2:519.21
ББК 72

ISBN: 978-5-518-34987-2

© В. Есипенко, 2014
© Lennex Corp., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые последовательно излагается разработанный автором метод прямого статистического анализа каскадных гаммерштейновских систем.

Кратко рассмотрены известные к моменту разработки предложенного метода методы статистического анализа динамических систем. Освещены достоинства и недостатки этих методов.

В первой главе рассматриваются интегральные модели, используемые в теории линейных и нелинейных динамических систем, и обосновываются их достоинства; приводятся многомерное и одномерное линейные интегральные уравнения Вольтерра второго рода, используемые для описания процессов в физически реализуемых линейных непрерывных системах управления с детерминированными параметрами с нулевыми и ненулевыми начальными условиями, а также нелинейные уравнения с интегральными операторами Урысона и Гаммерштейна, используемые для описания процессов в нелинейных физически реализуемых непрерывных системах управления; анализируются известные методы отыскания решений приведённых линейных и нелинейных интегральных уравнений; рассматриваются некоторые модели нелинейных систем класса Гаммерштейна; обсуждается проблема отыскания статистических характеристик выходных сигналов линейных и нелинейных динамических систем; констатируется отсутствие в настоящее время метода, который позволял бы в общем случае воздействия негауссовских случайных процессов решить проблему отыскания многомерных плотностей распределения вероятностей выходных сигналов динамических систем, и подчёркивается актуальность разработки такого метода.

Во второй главе показывается целесообразность отыскания одномерной плотности распределения вероятностей суммы случайных величин на основе свойств условных плотностей распределения вероятностей; развивается методика применения интегрального преобразования Лапласа-Стилтьеса в части использования “неполного изображения” с целью отыскания одномерной плотности распределения вероятностей суммы случайных величин; решается задача отыскания многомерной произвольной размерности и одномерной плотностей распределения вероятностей суммы произвольного числа зависимых случайных величин со случайными зависимыми коэффициентами при зависимых множествах указанных случайных величин и коэффициентов; решается задача отыскания совместной плотности распределения вероятностей произвольного числа в общем случае зависимых сумм с произвольным числом входящих в них зависимых случайных величин со случайными коэффициентами; доказывается утверждение о коммутативности многократной свёртки и функ-

ционального преобразования переменных многомерной плотности распределения вероятностей.

В третьей главе разрабатывается метод описания линейных динамических систем в вероятностной области с помощью многомерных плотностей распределения вероятностей мгновенных значений их импульсных характеристик; исследуется взаимосвязь ковариационной функции нестационарного случайного процесса с ковариационной и корреляционной функциями детерминированного сигнала; определяются основные вероятностные характеристики линейных динамических систем с детерминированными параметрами; разрабатывается методика отыскания совместной плотности распределения вероятностей случайных параметров линейной динамической системы первого порядка; определяется многомерная плотность распределения вероятностей мгновенных значений импульсной характеристики линейной динамической системы первого порядка со случайными параметрами, в том числе – RC-интегратора; рассматриваются предельные случаи, дающие возможность установить связь полученных результатов с известными.

В четвёртой главе решаются задачи отыскания многомерной, произвольной размерности, и одномерной плотностей распределения вероятностей случайных процессов на выходах линейных динамических систем с детерминированными и случайными параметрами в наиболее важном для практических целей переходном режиме работы этих линейных систем при нулевых начальных условиях и воздействии на их входы произвольного случайного (в том числе негауссовского) процесса с заданной многомерной плотностью распределения вероятностей его мгновенных значений; рассматриваются два подкласса линейных динамических систем, импульсные характеристики которых содержат и не содержат в своём составе дельта-функции.

В пятой главе решаются задачи отыскания многомерной, произвольной размерности, и одномерной плотностей распределения вероятностей случайных процессов на выходах линейных динамических систем с детерминированными и случайными параметрами в наиболее важном для практических целей переходном режиме работы этих линейных систем при ненулевых начальных условиях и воздействии на их входы произвольного случайного (в том числе негауссовского) процесса с заданной многомерной плотностью распределения вероятностей его мгновенных значений; рассматриваются два подкласса линейных динамических систем, импульсные характеристики которых содержат и не содержат в своём составе дельта-функции; для рассматриваемого случайного процесса на входе решается задача отыскания многомерной, произвольной размерности, плотности распределения вероятностей случай-

ного процесса на выходе линейной непрерывной системы управления с детерминированными параметрами при ненулевых начальных условиях.

В шестой главе решаются задачи отыскания многомерной, произвольной размерности, и одномерной плотностей распределения вероятностей случайных процессов на выходах линейных динамических систем с детерминированными и случайными параметрами в установившемся режиме работы этих линейных систем при воздействии на их входы произвольного случайного (в том числе негауссовского) процесса с заданной многомерной плотностью распределения вероятностей его мгновенных значений.

В седьмой главе решаются задачи

- отыскания многомерной, произвольной размерности, и одномерной плотностей распределения вероятностей случайного процесса на выходе различных вариантов нелинейной системы класса Гаммерштейна в переходном режиме при нулевых начальных условиях выходной линейной динамической системы с детерминированными и случайными параметрами при воздействии на входе системы двух произвольных случайных (в том числе негауссовских) процессов с заданными многомерными плотностями распределения вероятностей их мгновенных значений;
- отыскания многомерной, произвольной размерности, и одномерной плотностей распределения вероятностей случайных процессов на выходах различных вариантов расширенной нелинейной системы класса Гаммерштейна в переходном режиме работы соответствующих линейных динамических систем при нулевых начальных условиях:
 - с широкополосной входной линейной динамической системой с детерминированными параметрами,
 - с узкополосной входной линейной динамической системой с детерминированными параметрами,
 - с гауссовскими амплитудно-частотными характеристиками узкополосной входной и выходной линейных динамических систем с постоянными параметрами,
- отыскания многомерной, произвольной размерности, плотности распределения вероятностей случайного процесса на выходе каскадных гаммерштейновских систем с детерминированными параметрами в переходном режиме при нулевых начальных условиях и действии на входы этих систем произвольного случайного (в том числе негауссовского) процесса с заданной многомерной плотностью распределения вероятностей его мгновенных значений.

ВВЕДЕНИЕ

Жизнь современного общества немыслима без сложных территориально распределённых информационных систем, базирующихся на теснейшем взаимодействии и взаимном проникновении вычислительной техники и средств сбора, обработки, хранения, передачи и распределения информации.

Особо важное и всё возрастающее значение имеют цифровые системы связи, непрерывные и дискретные системы управления, измерительные системы и т.д., обладающие весьма высокими качественными характеристиками: информативностью, помехоустойчивостью и эффективностью.

Огромные успехи, достигнутые в последние десятилетия в этой области, открыли ряд совершенно новых возможностей по увеличению быстродействия, точности и разрешающей способности измерительной техники, по фильтрации, преобразованию и усилению сигналов.

Достижение высоких качественных характеристик информационных систем обусловлено разумным сочетанием высокоточных технологий, современных методов управления, формирования, передачи, приёма и обработки полезных сигналов с учётом действия неизбежно присутствующих помех.

Среди этих методов на всех этапах развития информационных систем особенно важное место занимали методы нелинейной обработки сигналов и последующей фильтрации тех или иных компонент на выходе безынерционного нелинейного четырёхполюсника.

В то время как методы линейной фильтрации достаточно быстро достигли своих предельных возможностей, методы нелинейной обработки сигналов оказались настолько разнообразны и продуктивны, что поиску новых таких методов и исследованию их возможностей уделялось самое пристальное внимание на всех этапах развития информационных систем (число работ в целом трудно обозримое).

Во многих работах отмечалось, что именно отыскание новых методов нелинейной обработки сигналов является наиболее перспективным направлением в решении огромного числа задач в самых различных областях радиофизики, радиотехники, связи, автоматического управления и т.д.

Исследования в области таких традиционных нелинейных преобразований как модуляция и демодуляция, которые принято рассматривать как нелинейные информационные преобразования, так как при этом в сигнал вводится полезная информация или извлекается из него, по-видимому, уже достигают своей полноты и законченности.

В аналоговых системах связи дополнительные нелинейные преобразования сигналов по информационному параметру в условиях действия помех приводят к существенному снижению их качественных характеристик.

В системах связи находят широкое применение такие виды нелинейных неинформационных преобразований (преобразований, при которых в сигнал не вводится и из него не извлекается полезная информация) как перенос спектра полезного сигнала в другую область частот, умножение частоты (чаще в передатчике), ограничение (в основном в приёмном устройстве) и др.

Нелинейные неинформационные преобразования как аналоговых, так и дискретных сигналов в условиях действия как гауссовских, так и негауссовских помех лежат в основе методов повышения качественных характеристик информационных систем.

Более того, весьма важным преимуществом дискретных информационных систем перед аналоговыми является то обстоятельство, что использование в условиях действия помех нелинейных преобразований даже по информационным параметрам сигналов (кроме систем с фазовой манипуляцией) не приводит к ухудшению их качественных характеристик.

Наиболее точными и надёжными, исключаящими возможность привнесения любых субъективных факторов в оценки качественных характеристик информационных систем в целом или отдельных блоков обработки сигналов, являются вероятностные критерии, основывающиеся на использовании “тонкой структуры” случайного процесса на выходе [1]. Энергетические же критерии являются неполными и во многих случаях неприемлемы.

Применение того или иного вероятностного критерия оценки качества обработки сигналов требует знания в общем случае многомерной плотности распределения вероятностей случайного процесса на выходе системы связи в целом или отдельных блоков обработки.

Даже в том случае, когда на входе приёмного устройства информационной системы действует помеха в виде гауссовского случайного процесса, использование методов нелинейной обработки сигналов с целью повышения качественных характеристик этой системы естественным образом влечёт за собой необходимость использования линейной динамической системы для фильтрации тех или иных компонент на выходе безынерционного нелинейного четырёхполюсника при условии, что на её входе действует уже негауссовский случайный процесс.

Последнее обстоятельство приводит к сложной проблеме отыскания многомерной плотности распределения вероятностей случайного процесса на выходе линей-

ной динамической системы, когда случайный процесс на её входе не является гауссовским.

Важность и сложность данной проблемы настолько велики, а пути её возможного решения настолько не просматривались, что в [2,3] отмечено: "...за исключением так называемых марковских процессов и линейного преобразования нормальных процессов нельзя указать метод "пересчёта" непосредственно самих плотностей вероятностей при инерционных преобразованиях случайных процессов".

Отсутствие метода статистического анализа линейных динамических систем, который позволял бы в общем случае воздействия на входы этих систем с постоянными, переменными детерминированными и случайными параметрами произвольного случайного (в том числе негауссовского) процесса с заданной многомерной плотностью распределения вероятностей его мгновенных значений разрешить данную проблему, в значительной мере препятствует широкому внедрению и глубокой теоретической проработке высокоэффективных методов нелинейной обработки сигналов с целью повышения качественных характеристик информационных систем.

Для решения данной проблемы разработано несколько приближённых аналитических и экспериментальных методов, которые уместно назвать косвенными.

Метод моментных функций предложен и исследован в [4].

Анализу возможностей данного метода посвящено достаточно много работ [см., напр., 1 – 3, 5 – 8], где выявлено ряд существенных недостатков этого метода. Отметим главный: как показано в [6], не существует не только никакого вероятностного распределения, все высшие моментные функции которого, начиная с некоторой, равны нулю, но невозможно даже графически изобразить такую плотность распределения вероятностей.

Метод квазимоментных функций предложен в [9].

Анализу возможностей этого метода посвящены работы [1 – 5, 10 – 11], из которых следует, что данный метод статистического анализа линейных динамических систем несколько снижает, но не исключает основные недостатки, свойственные рассмотренному выше методу моментных функций.

Метод кумулянтных функций. Исследованию метода статистического анализа линейных динамических систем, основанного на использовании кумулянтов и кумулянтных функций, посвящено достаточно много работ, результаты которых весьма полно обобщены в [6], где показано, что конечному набору кумулянтов всегда соответствует некоторая "хорошая" вещественная функция, аппроксимирующая плотность распределения вероятностей, в то время как несингулярной функции, все высшие моменты которой равнялись бы нулю, не существует.